

פרק 9 – מערכות ייחוס



הפיזיקה היא תחום מדעי שעוסק בתיאור תופעות טבע על ידי ניסוח חוקים (פיזיקליים) המסבירים ומתארים תופעות אלה. חוקים אלה מוצגים כניסוח מילולי או על ידי ביטויים מתמטיים המקשרים בין הגדלים השונים המתארים תופעה מסוימת. פיתוח חוקי הפיזיקה מתבסס על תצפיות ועל מדידת הגדלים הפיזיקליים הקשורים לתופעה הפיזיקלית הנחקרת. לכן תהליך המדידה נחשב לאחד מהעמודים המרכזיים עליהם נשענת הפיזיקה.

כאשר צופה מודד גודל פיזיקלי מסוים (מהירויות, תאוצות, כוח וכדומה) הוא מודד אותו ביחס למערכת צירים שנקראת מערכת ייחוס. בדרך כלל מערכת זו קשורה לצופה עצמו, ומכיוון שהצופה לרוב נמצא במנוחה ביחס לכדור הארץ, נקבל שהמדידות הנערכות על ידי צופה על פני כדור הארץ הן ביחס למערכת צירים הקשורה לכדור הארץ. כתוצאה מכך, צופים שונים הנמצאים במנוחה על כדור הארץ ואשר עורכים מדידות של גדלים פיזיקליים הקשורים לגוף מסוים כמו תאוצה, כוח וכדומה, אמורים לקבל תוצאות זהות.

נשאלת השאלה, מה קורה אם צופים שונים מבצעים מדידה של גודל פיזיקלי מסוים ממערכות ייחוס שונות אשר אינן נמצאות במנוחה ביחס לכדור הארץ? האם הם מקבלים את אותן התוצאות כמו במערכות הייחוס הקשורות לכדור הארץ? התשובה לשאלה זו מכרעת, כי היא קובעת אם חוקי הפיזיקה הם זהים בכל מערכות הייחוס, או משתנים בהתאם למערכת הייחוס.

מתברר שבמקרים מסוימים התשובה לשאלה זו היא פשוטה, אבל במקרים אחרים התשובה היא מורכבת ומגיעה לרמות המחייבות לעסוק בתיאוריות כמו תורת היחסות הפרטית או הכללית, רמה שהיא חורגת ממסגרת ספר זה.

בפרק זה נדון במקרים שבהם ניתן לתת תשובות לשאלה הקודמת. לשם כך נתחיל בהגדרת מערכת התמדה.

1. מערכת התמדה (מערכת אינרציאלית)

מערכת התמדה מוגדרת באופן הבא:

הגדרה 1: מערכת התמדה היא מערכת הנמצאת במנוחה או נעה במהירות קבועה (גודל וכיוון).

מכיוון שהתנועה היא גודל יחסי, קיימת בעיה בקביעה אם גוף נמצא במנוחה או נע במהירות קבועה או משתנה. לשם כך נדרשת מערכת ייחוס הנמצאת במנוחה מוחלטת, וביחס אליה הגופים ביקום נמצאים בתנועה או במנוחה. כמובן, כדור הארץ אינו יכול להיות מערכת כזו, כי כדור הארץ מסתובב סביב צירו וסביב השמש, והשמש גם נעה סביב מרכז הגלקסיה והגלקסיה נמצאת גם היא בתנועה. בקיצור, כדור הארץ לא יכול להיות מערכת מנוחה מוחלטת.

בגלל המרחק הרב שלהם מאיתנו (אלפי ומאות אלפי שנות אור), הכוכבים הרחוקים נראים לנו במנוחה. זאת כי במרחקים כל כך גדולים השינוי הזוויתי במיקום שלהם זניח, כך שלא מבחינים בשינוי המקום שלהם לאורך מאות שנים ואף אלפי שנים, אפילו אם הם משנים את מיקומם.

כתוצאה מכך, הפיזיקאים בחרו בהתחלה את מערכת המנוחה המוחלטת כמערכת הצירים הקשורה לכוכבים הרחוקים. מכאן שניתן להגדיר מערכת ההתמדה באופן הבא:

הגדרה 2: מערכת התמדה היא המערכת הנמצאת במנוחה או בתנועה במהירות קבועה ביחס לכוכבים הרחוקים הנמצאים במנוחה מוחלטת.

יש לשים לב לכך שאם מוצאים מערכת התמדה שנעה במהירות קבועה (גודל וכיוון) ביחס לכוכבים הרחוקים, אז כל מערכת אחרת שנעה במהירות קבועה ביחס למערכת זו היא גם מערכת התמדה.

קיים קושי לקבוע באופן מעשי אם מערכת מסוימת נמצאת בתנועה במהירות קבועה (במצב התמדה) ביחס לכוכבים הרחוקים. מסיבה זו יש צורך לחפש הגדרה חלופית למערכת התמדה המאפשרת לנו לקבוע בקלות ובאופן מעשי אם מערכת מסוימת נמצאת במנוחה או נעה במהירות קבועה ביחס לכוכבים הרחוקים.

על מנת למצוא הגדרה חדשה למערכת ההתמדה, צריכים קודם לבדוק מהו השוני מבחינת מדידות בין מערכת הנמצאת בתנועה במהירות קבועה ביחס לכוכבים הרחוקים ובין מערכת הנעה במהירות לא קבועה (בתאוצה) ביחס לכוכבים אלה.

נשים לב לתכונה הבאה: אם במערכת ייחוס הנעה במהירות קבועה ביחס לכוכבים הרחוקים, מתקיים שהכוח השקול הפועל על גוף מסוים במערכת זו מתאפס ($\Sigma \vec{F} = 0$) אזי, על פי החוק הראשון של ניוטון, תאוצת הגוף מתאפסת במערכת זו ($\vec{a} = 0$). מכיוון שאם תאוצת גוף מתאפסת במערכת הנעה במהירות קבועה, היא מתאפסת ביחס לכל המערכות הנעות במהירות קבועה ביחס למערכת זו, נקבל שהחוק הראשון של ניוטון מתקיים בכל המערכות הנמצאות במנוחה או בתנועה במהירות קבועה ביחס לכוכבים הרחוקים. בקיצור, בכל מערכות ההתמדה מתקיים החוק הראשון של ניוטון.

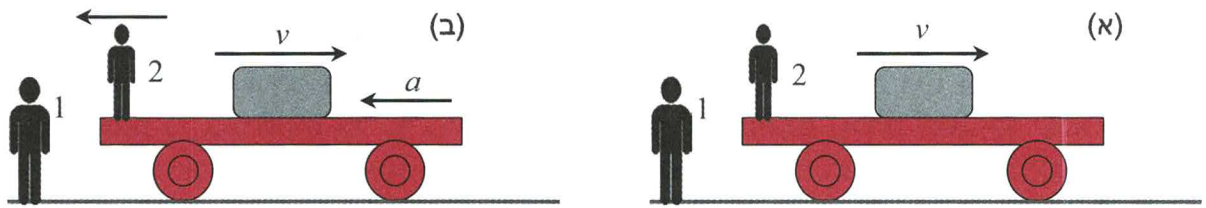
לעומת זאת, אם נתונה מערכת הנעה בתאוצה ביחס למערכות ההתמדה, אז גוף שתאוצתו מתאפסת במערכת ההתמדה, היא אינה מתאפסת ביחס למערכת אשר נעה בתאוצה. מכאן, ביחס למערכת הנעה בתאוצה, למרות שמתקיים $\Sigma \vec{F} = 0$ עבור הגוף, תאוצתו אינה מתאפסת ($\vec{a} \neq 0$), כלומר במערכת ייחוס שאינה מערכת התמדה לא מתקיים החוק הראשון של ניוטון. נוכל להראות זאת בדוגמה הבאה:

באיור 1 מתוארת עגלה וגוף מונח עליה. העגלה והגוף נעים במהירות קבועה v ביחס לכביש. נתון שמשטח העגלה חלק ושהכוח השקול על הגוף הנמצא על העגלה שווה לאפס. תאוצתו של גוף זה שווה לאפס הן ביחס לצופה 1 הנמצא על הכביש והן ביחס לצופה 2 הנמצא על העגלה. לכן לגבי שני הצופים (כלומר לגבי שתי המערכות; הכביש והעגלה) מתקיים החוק הראשון של ניוטון ושתי המערכות נחשבות למערכות התמדה.

נניח כעת שמסיבה כלשהי העגלה מתחילה להאט את מהירותה בקצב קבוע a כפי שמתואר באיור 1ב. במקרה זה, הגוף ממשיך לנוע בתנועה במהירות קבועה ביחס לצופה 1. לכן לגבי צופה זה החוק הראשון ממשיך להתקיים ($\Sigma \vec{F} = 0$ וגם $\vec{a} = 0$). לעומת זאת, ביחס לצופה 2 הנמצא על

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 9: מערכות ייחוס

העגלה ואשר נע בתאוטה (בתאוטה) ביחד עם העגלה, הגוף נע בתאוטה a קדימה (בגלל שהעגלה נמצאת בתאוטה) וזאת למרות שהכוח השקול על הגוף עדיין אפס ($\sum \vec{F} = 0$). כלומר החוק הראשון של ניוטון לא מתקיים עבור צופה 2.



איור 1: שני צופים, אחד על הכביש והאחר על העגלה, צופים בגוף המונח על עגלה כאשר; (א) העגלה וביחד אתה הגוף נעים במהירות קבועה. (ב) העגלה נעה בתאוטה בזמן שהגוף ממשיך לנוע במהירות קבועה ביחס לכביש.

מכאן ניתן להגדיר את מערכת ההתמדה באופן הבא:

הגדרה 3: כל מערכת ייחוס שבה מתקיים החוק הראשון של ניוטון היא מערכת התמדה.

לכן נוכל לסכם:

- על מנת שנבדוק אם מערכת מסוימת היא מערכת התמדה, צריך לבדוק אם במערכת זו מתקיים החוק הראשון של ניוטון. כלומר יש לצפות בגוף שסכום הכוחות עליו במערכת זו מתאפס. אם גם תאוטתו מתאפסת, אז המערכת היא מערכת התמדה, ואם תאוטתו לא מתאפסת, מערכת זו אינה מערכת התמדה.
- כל מערכת הנעה במהירות קבועה ביחס למערכת התמדה אחרת, היא מערכת התמדה גם כן. לכן כל המערכות הנעות במהירות קבועה זו ביחס לזו הן מערכות התמדה.
- אם נתון גוף הנמצא במצב התמדה במערכת ייחוס מסוימת, אז קיים מספר אינסופי של מערכות שבהן הגוף נמצא במצב התמדה. רק באחת המערכות האלה מהירות הגוף מתאפסת. מערכת זו שבה מהירות הגוף מתאפסת נקראת **מערכת המנוחה** של הגוף.

2. חוקי ניוטון ומערכות ההתמדה

מצאנו בסעיף הקודם כי החוק הראשון של ניוטון מתקיים בכל מערכות ההתמדה (המערכות הנעות זו ביחס לזו במהירות קבועה).

מה לגבי שני החוקים האחרים, השני והשלישי, האם הם מתקיימים בכל מערכות ההתמדה גם כן? נתחיל מהחוק השני של ניוטון:

באיור 2 מתוארות שתי מערכות התמדה, xy ו- $x'y'$ שבהן זוגות הצירים x, x' ו- y, y' מקבילים זה לזה. נתון כי המערכת $x'y'$ נעה בכיוון ציר x במהירות קבועה v_0 ביחס למערכת xy (ראה איור 2). נתון שבראשית הצירים של המערכת xy נמצא צופה A ובראשית הצירים של המערכת $x'y'$ נמצא צופה B . נניח שב- $t=0$ שתי הראשיות חופפות. בחלוף זמן t המרחק בין הצופים נעשה $v_0 t$ (ראה איור 2). לכן אם הצופה A צופה בגוף הנמצא במיקום x_A על ציר x , אז מיקומו ביחס לצופה B יהיה:

$$(1) \quad x'_B = x_A - v_0 t$$

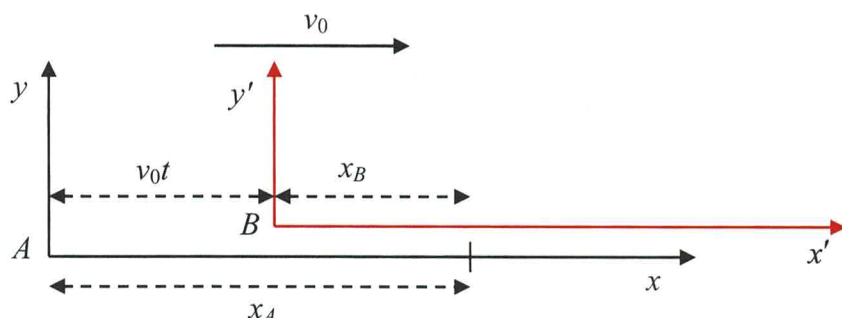
בנוסף, אם הצופה A צופה בגוף הנע לאורך ציר x במהירות v_A , אז מהירות הגוף ביחס לצופה B תהיה:

$$(2) \quad v_B = v_A - v_0$$

ואם תאוטת הגוף ביחס לצופה A היא a_A אז תאוטתו ביחס לצופה B היא: $a_B = a_A - a_0$, כאשר a_0 היא תאוטת המערכת $x'y'$ ביחס למערכת xy . מכיוון ש- $a_0 = 0$, נקבל:

$$(3) \quad a_B = a_A$$

הקשרים (1)-(3) הם קשרים המקשרים בין ערכי הגדלים הנמדדים במערכת A ובין ערכיהם הנמדדים במערכת B , כלומר הם מעבירים את הערכים ממערכת התמדה אחת למערכת התמדה אחרת, לכן קשרים אלה נקראים טרנספורמציות. מכיוון שגלילאו גליליי היה הראשון שפתח טרנספורמציות אלו, הן נקראות **טרנספורמציות גלילאו**.



איור 2: מערכת $x'y'$ הנעה במהירות קבועה ביחס למערכת xy .

מהקשר האחרון (3) מגיעים למסקנה חשובה, והיא: אם גוף נע בתאוצה a_A במערכת התמדה A והכוח השקול עליו על פי החוק השני של ניוטון הוא $\Sigma F_A = ma_A$, אז הכוח השקול הפועל עליו במערכת B , שהיא גם מערכת התמדה, נתון על ידי: $\Sigma F_B = ma_B$. מכיוון שמתקיים על פי הקשר (3) $a_B = a_A$, נקבל: $\Sigma F_B = \Sigma F_A$. כלומר החוק השני של ניוטון מתקיים בכל מערכות ההתמדה. ניתן להכליל את התוצאה האחרונה לתנועה במהירות קבועה בשני ממדים או שלושה ממדים. מכאן שהחוק השני של ניוטון מתקיים בכל מערכות הייחוס שהן במצב התמדה.

מהעובדה שהחוק השני של ניוטון מתקיים בכל מערכות ההתמדה, נקבל שהחוק השלישי של ניוטון גם הוא מתקיים בכל מערכות ההתמדה. נסביר זאת:

מכיוון שעל פי ההסבר הקודם, הכוחות אינם משתנים (מבחינת גודלם וכיוונם) במעבר ממערכת התמדה אחת למערכת התמדה אחרת, נקבל שכוחות האינטראקציה בכל מערכות ההתמדה נשארים שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. במלים אחרות, החוק השלישי של ניוטון מתקיים גם הוא בכל מערכות ההתמדה.

לסיכום: חוקי ניוטון מתקיימים בכל מערכות ההתמדה.

3. עקרון היחסות

ניתן להכליל את התוצאה שקיבלנו בסעיף הקודם לתוצאה כללית והיא: חוקי הפיזיקה זהים בכל מערכות ההתמדה.

תוצאה זו נקראת **עקרון היחסות**. על סמך עקרון היחסות, ניתן להגיע למסקנה הבאה: לא ניתן לערוך ניסוי כלשהו במערכת התמדה כלשהי שניתן באמצעותו לגלות אם מערכת זו נמצאת במנוחה או בתנועה במהירות קבועה (גודל וכיוון).

על מנת להבהיר זאת נניח שאסטרונאוט מתרחק בחללית שלו מכדור הארץ במהירות קבועה. לאחר זמן רב הוא מגיע הרחק מכוכבי הלכת, למקום שלא פועל על החללית אף כוח חיצוני. אם החללית במצב זה נמצאת במצב התמדה, אין אף ניסוי שהאסטרונאוט יכול לערוך בתוך החללית שבאמצעותו ניתן לקבוע שהחללית נמצאת במנוחה או שהיא נעה במהירות קבועה ביחס לכוכבים הרחוקים.

ניתן גם לתת דוגמה לעקרון היחסות על פני כדור הארץ, למרות שכדור הארץ, כפי שנראה בהמשך, לא נחשב למערכת התמדה מושלמת, אבל "בלית ברירה" ניתן להתייחס אליו בקירוב טוב כמערכת התמדה. אם אנו נמצאים בתוך תא אטום שהוכנס, לדוגמה, למטוס כך שלא ניתן לראות מה מתרחש מחוץ למטוס, ונניח שהמטוס טס בגובה נמוך במהירות קבועה ללא תנודות או רעש

כלשהו, אז לא קיים ניסוי שניתן לערוך בתוך התא ולגלות באמצעותו את מצב המטוס, כלומר לא ניתן לקבוע שהמטוס נמצא במנוחה על פני כדור הארץ או נמצא בתנועה במהירות קבועה ביחס לכדור הארץ. אם נשחרר גוף ממנוחה נגלה שהוא נופל בתאוצה כלפי מטה בדיוק כפי שקורה על פני כדור הארץ (בהזנחת השינוי בתאוצת הכובד הנובע משינוי הגובה ביחס לפני הקרקע). אם נזרוק גוף בזווית הוא ינוע באותו מסלול בדיוק כפי שהיה נע על פני כדור הארץ. אם נמדוד את משקלו של גוף בתוך המטוס נקבל את אותה תוצאה כפי שהיינו מקבלים על פני כדור הארץ.

4. למה כדור הארץ לא נחשב למערכת התמדה

כדור הארץ לא נמצא במנוחה ביחס לכוכבים הרחוקים, וגם לא נע במהירות קבועה ביחס אליהם. כדור הארץ מסתובב סביב צירו, וכתוצאה מסיבוב זה יש לנקודות הנמצאות על קו המשווה מהירות קווית שגודלה כ- 465 m/s , ובנוסף כדור הארץ מסתובב סביב השמש במסלול אליפטי במהירות ממוצעת של 30 km/s . כדור הארץ נע גם סביב מרכז הגלקסיה כתוצאה מתנועת השמש. ואם רוצים להמשיך, הגלקסיה נעה בחלל ועוד....

כתוצאה מהתנועה הסיבובית של כדור הארץ סביב צירו יש לנקודות על פניו תאוצה צנטריפטלית. גודל תאוצה זו על קו המשווה (כפי שמצאנו בדוגמה 2 בתת סעיף 6.4 בפרק 8) הוא 0.034 m/s^2 בקירוב. כתוצאה מסיבוב כדור הארץ סביב השמש יש לכדור הארץ תאוצה ממוצעת לכיוון השמש שגודלה $\sim 6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$, וכתוצאה מתנועת כדור הארץ סביב מרכז הגלקסיה יש לו תאוצה ממוצעת של 10^{-10} m/s^2 בערך. לכן לא ניתן להתייחס לכדור הארץ כאל מערכת התמדה מושלמת. אבל, כאמור, מכיוון שהתאוצות של כדור הארץ הנובעות מתנועותיו השונות הן קטנות מאוד, ניתן להתייחס לכדור הארץ בקירוב טוב כאל מערכת התמדה, במיוחד בניסויים שבהם לא נדרש דיוק רב, והתאוצות הנמדדות (לדוגמה תאוצת הכובד) גדולות ביחס לתאוצת כדור הארץ סביב צירו או סביב השמש.

ישנם הרבה תצפיות וניסויים שבאמצעותם ניתן להראות שכדור הארץ אינו מערכת אינרציאלית. להן תצפית אחת וניסוי אחד:

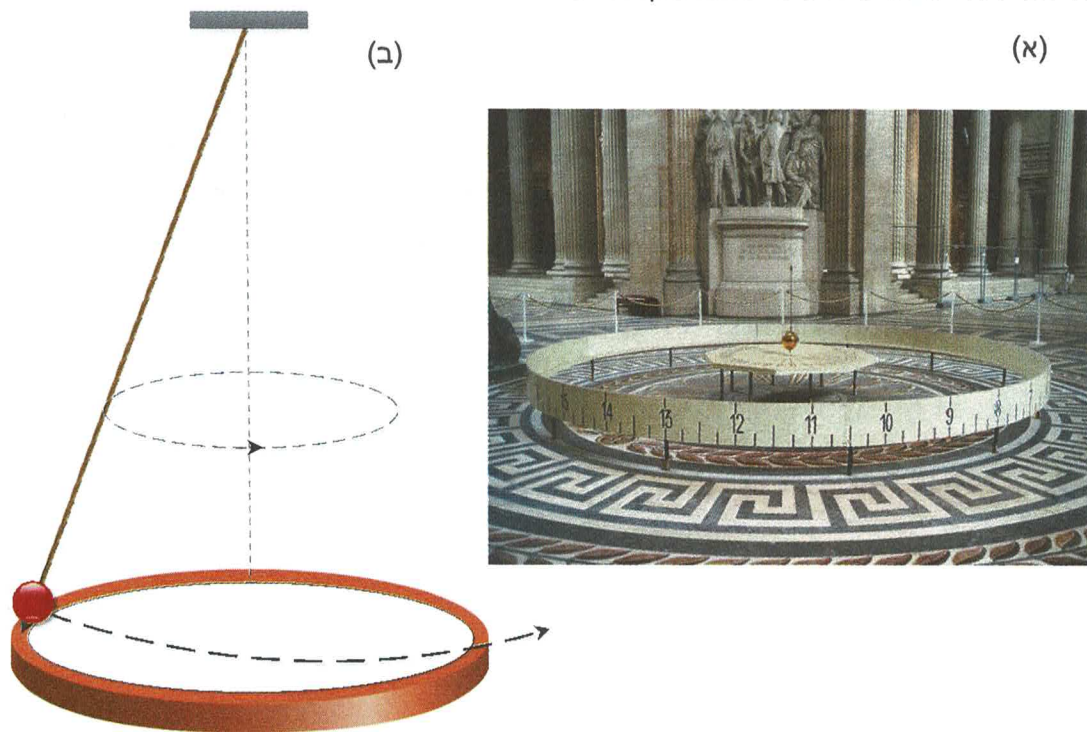
1. **תצפית:** זרימת המים דרך פתח כיור: כאשר מים זורמים דרך פתח כיור מלא מים, נגלה תמיד (בסביבתנו הגאוגרפית) שהמים זורמים כשהם מסתובבים נגד כיוון תנועת מחוגי השעון. מצטבר שבכל המקומות בחצי הצפוני של כדור הארץ המים זורמים בכיור כשהם יוצרים מערבולת ומסתחררים בכיוון מנוגד לכיוון תנועת מחוגי השעון. לעומת זאת, בכל החצי הדרומי של כדור הארץ המים זורמים דרך פתח הכיור כשהם מסתובבים הפוך, כלומר בכיוון תנועת מחוגי השעון. לא נכנס כאן לכוחות הפועלים על המים במהלך זרימתם ואשר גורמים להם להסתחרר, אבל נציין שכוחות אלה נובעים מכך שכדור הארץ מסתובב סביב צירו. אם כדור הארץ היה מערכת התמדה, המים היו זורמים דרך פתח הכיור ללא ערבול.

2. **ניסוי פוקו:** ניסוי זה נערך בפריז בשנת 1851 ובו הדגים פוקו (Leon Foucault) שהיה פיזיקאי צרפתי) שכדור הארץ מסתובב סביב צירו. הניסוי בנוי מכבל שאורכו 67 מטרים הקשור בקצהו האחד לתקרת אולם גבוה ולקצהו האחר קשור כדור ברזל שמסתו 28 kg , כפי שמתואר באיור 3א. אם מסיטים אותו מעט ממקומו, כדור זה מתנדנד הלך ושוב בתנועה הרמונית פשוטה. אם כדור הארץ לא היה מסתובב סביב צירו, מישור התנודה של המטוטלת היה נשאר קבוע במרחב. אולם בגלל שכדור הארץ מסתובב סביב צירו, מתברר שמישור התנודה של המטוטלת משנה במקצת את כיוונו מתנודה לתנודה, כפי שמתואר באיור 3ב, והוא משלים מחזור שלם (360°) תוך זמן T' הנתון על ידי:

$$(4) \quad T' = \frac{T}{\sin \phi}$$

כאשר $T = 24 \text{ h}$ הוא זמן המחזור של כדור הארץ סביב צירו ו- ϕ היא זווית קו הרוחב במקום

בו נמצאת המוטטלת. בקטבים $\phi = 90^\circ$ ולכן $T' = T = 24 \text{ h}$, וככל שנעים לכיוון קו המשווה הזווית ϕ קטנה, $\sin \phi$ קטן, והזמן T' גדל. בקו המשווה מתקיים $\phi = 0$ ולכן $T' = \infty$, כלומר מישור הסיבוב אינו משנה כיוונו בקו המשווה.



איור 3: (א) צילום של מערכת פוקו. (ב) תרשים למוטטלת פוקו.

פוקו מדד את זמן המחזור של סיבוב מישור התנועה של המוטטלת (הזמן T'), ועל ידי הזווית ϕ חישב את זמן המחזור של סיבוב כדור הארץ סביב צירו (שהוא 24 שעות).

5. כוח הכובד ועיקרון השקילות

עיקרון השקילות הוא עיקרון שפיתח אלברט איינשטיין על מנת לענות על השאלה האם האור מושפע משדה הכובד או לא, ובמילים אחרות האם האור, שהוא חסר מסה, נמשך לכוכבים כמו שנמשכים אליהם גופים שיש להם מסה?

הניתוח הבא שפיתח איינשטיין מציג את תהליך החשיבה שהוביל לעיקרון שנקרא "עיקרון השקילות":

אסטרונאוטים נמצאים בתוך תא סגור בתוך חללית באזור בו לא קיים כוח הכובד. צוות הבקרה יכול לשלוט בחללית מרחוק. לאסטרונאוטים אין קשר עם תחנת הבקרה על כדור הארץ.

האסטרונאוטים מרחפים בתוך התא חסרי משקל, ואינם יכולים לראות מה מתרחש בחוץ. צוות הבקרה על כדור הארץ מחליט להחזיר את החללית לכדור הארץ, ולשם כך הוא מפעיל את מנועי החללית והיא עוברת טלטלה עד שפעולת המנועים מתייצבת. במצב זה החללית נעה בתאוצה קבועה של 10 m/s^2 בכיוון כדור הארץ. במהלך תהליך זה האסטרונאוטים מרגישים טלטלה בחללית שבמהלכה פועל עליהם כוח משתנה, שכתוצאה ממנו הם נצמדים לאחד הדפנות של החללית. לאחר שתאוצת החללית מתייצבת, האסטרונאוטים מרגישים שפועל עליהם כוח קבוע לעבר דופן מסוימת, כלומר הם נמשכים לכיוון דופן זאת ויכולים לעמוד עליה וללכת כאילו הם נמצאים על פני כדור הארץ.

מכיוון שהאסטרונאוטים לא מודעים לתהליך שהתרחש, מתעורר ביניהם וויכוח. חלק מהם טוענים שהחללית נחתה על פני כדור הארץ וכי הם נמצאים תחת השפעת שדה הכובד של כדור הארץ. חלק אחר טוענים שהחללית נעה בתאוצה קבועה בחלל. כתוצאה מתאוצה זו הם נצמדים לדופן

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 9: מערכות ייחוס

החללית הנגדית, ומופעל עליהם כוח על ידי דופן זו, כוח שנותן להם את תחושת המשקל. על מנת לבדוק את טענותיהם, האסטרונוטים (שלמדו כולם פיזיקה!) החליטו לערוך מספר ניסויים. להלן שניים מהם: הם משחררים גוף ממנוחה, עוקבים אחרי תנועתו ומגלים שהוא נע בתאוצה קבועה של 10 m/s^2 לכיוון הדופן עליה הם עומדים. לאחר מכן הם קושרים גוף שמסתו 0.4 kg לקצה קפיץ שהקבוע שלו 40 N/m , מחזיקים בקצה האחר ומגלים שהקפיץ התארך ב- 0.1 m . כלומר, משקל הגוף בתוך החללית הוא 40 N .

את תוצאות שני הניסויים האלה ניתן להסביר גם על סמך ההנחה שהחללית נמצאת על פני כדור הארץ וגם על סמך ההנחה שהחללית נעה בחלל בתאוצה קבועה של 10 m/s^2 בכיוון המנוגד לכיוון נפילת הגוף. האסטרונוטים מגיעים במהרה למסקנה שלא ניתן באמצעות ניסויים אלה וגם לא באמצעות אף ניסויי אחר לקבוע איזה מבין שתי ההנחות היא הנכונה.

מסוגיה זו הגיע איינשטיין לאחד העקרונות החשובים ביותר בתורת היחסות הכללית, שנקרא **עיקרון השקילות**, והוא:

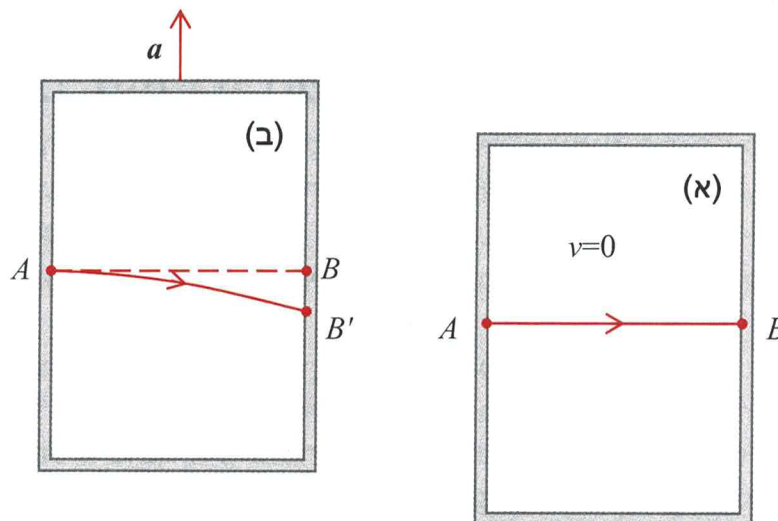
השפעת שדה כובד אחיד על גוף הנמצא בתוכו שקולה להשפעה הנוצרת על גוף זה כשהוא נמצא בתוך מערכת הנעה בתאוצה הזוהה לתאוצת הכובד של שדה הכובד.

איינשטיין הרחיב את עיקרון השקילות לעיקרון רחב יותר שנקרא **עיקרון היחסות הכללית**, והוא: חוקי הפיזיקה זהים בתוך שדה כובד אחיד או בתוך מערכת הנעה בתאוצה השווה לתאוצת הכובד בשדה זה.

או באופן זהה:

לא ניתן לערוך ניסוי שבאמצעותו אפשר לגלות באם מערכת סגורה נמצאת בשדה כובד אחיד, או שהיא נעה בתאוצה קבועה הזוהה לתאוצת הכובד של שדה זה.

על סמך עיקרון זה ניתן לענות על השאלה האם האור מושפע משדה הכובד או לא. כל מה שעלינו לעשות הוא לעקוב אחרי מהלך קרן אור בתוך מערכת מואצת. באיור 4 מתוארת מערכת סגורה שנמצאת במנוחה וקרן אור המכוונת לרוחבה מהנקודה A .



איור 4: (א) קרן אור נעה בתוך מערכת הנמצאת במנוחה. (ב) מהלך קרן האור כשהמערכת נעה בתאוצה כלפי מעלה.

קרן האור נעה בקו ישר ופוגעת בנקודה B ממול (ראה איור 4א). כעת, אם המערכת נעה בתאוצה בכיוון המתואר באיור 4ב, נגלה כי קרן האור שנפלטת מ- A לא נעה בקו ישר לעבר הנקודה B , אלא נעה ביחס למערכת הסגורה בקו עקום ופוגעת בנקודה B' שנמצאת מתחת לנקודה B (ראה תרשים).

על פי עיקרון השקילות נקבל שקרן האור מתנהגת באופן דומה בהשפעת שדה כובד, כלומר האור מושפע משדה הכובד.

סיכום פרק 9

- לערוך ניסוי כלשהו במערכת התמדה כלשהי שניתן באמצעותו לגלות אם מערכת זו נמצאת במנוחה או בתנועה במהירות קבועה (גודל וכיוון).
8. כתוצאה מהתנועה הסיבובית של כדור הארץ סביב צירו יש לנקודות על פניו תאוצה צנטריפטלית שגודלה בקו המשווה הוא 0.034 m/s^2 בקירוב. כתוצאה מסיבוב כדור הארץ סביב השמש יש לכדור הארץ תאוצה ממוצעת לכיוון השמש שגודלה $6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$, וכתוצאה מתנועת כדור הארץ סביב מרכז הגלקסיה יש לו תאוצה ממוצעת של 10^{-10} m/s^2 בערך. לכן כדור הארץ אינו מערכת התמדה מושלמת. אבל, מכיוון שהתאוצות של כדור הארץ הנובעות מתנועותיו השונות הן קטנות מאוד, ניתן להתייחס לכדור הארץ בקירוב טוב כאל מערכת התמדה, במיוחד בניסויים שבהם התאוצות הנמדדות (לדוגמה תאוצת הכובד) גדולות ביחס לתאוצת כדור הארץ סביב צירו או סביב השמש.
9. עיקרון השקילות הוא: השפעת שדה כובד אחיד על גוף הנמצא בתוכו שקולה להשפעה הנוצרת על גוף זה כשהוא נמצא בתוך מערכת הנעה בתאוצה הזוהי לתאוצת הכובד של שדה הכובד.
10. על פי עיקרון השקילות מתקבל שחוקי הפיזיקה בתוך שדה כובד אחיד זהים לחוקי הפיזיקה בתוך מערכת הנעה בתאוצה השווה לתאוצת הכובד בשדה זה. על פי עיקרון זה לא ניתן לערוך ניסוי שבאמצעותו אפשר לגלות באם מערכת סגורה נמצאת בשדה כובד אחיד, או שהיא נעה בתאוצה קבועה הזוהי לתאוצת הכובד של שדה זה.

1. פיתוח חוקי הפיזיקה מתבסס על תצפיות ועל מדידת הגדלים הפיזיקליים הקשורים לתופעה הפיזיקלית הנחקרת. לכן תהליך המדידה נחשב לאחד מהעמודים המרכזיים עליהם נשענת הפיזיקה.
2. כאשר צופה מודד גודל פיזיקלי מסוים (מהירויות, תאוצות, כוח וכדומה) הוא מודד אותו ביחס למערכת צירים שנקראת מערכת ייחוס. בדרך כלל מערכת זו קשורה לצופה עצמו, ומכיוון שהצופה לרוב נמצא במנוחה ביחס לכדור הארץ, נקבל שהמדידות הנערכות על ידי צופה על פני כדור הארץ הן ביחס למערכת צירים הקשורה לכדור הארץ.
3. מתברר שחוקי הפיזיקה זהים בכל מערכות ההתמדה, כתוצאה מכך צופים שונים הנמצאים במערכות התמדה שונות אמורים לקבל אותה תוצאה כאשר הם מבצעים מדידה של גודל פיזיקלי מסוים ממערכות אלה.
4. מערכת התמדה היא מערכת שמתקיים בה החוק הראשון של ניוטון. כלומר זו היא מערכת אשר אם מתקיים בה שהכוח השקול הפועל על גוף מסוים במערכת זו מתאפס ($\Sigma \vec{F} = 0$) אזי גם תאוצתו מתאפסת במערכת זו ($\vec{a} = 0$).
5. כל מערכת הנעה במהירות קבועה ביחס למערכת התמדה אחרת, היא מערכת התמדה גם כן. לכן כל המערכות הנעות במהירות קבועה זו ביחס לזו הן מערכות התמדה.
6. מערכת המנוחה היא מערכת התמדה שבה מהירות הגוף מתאפסת.
7. עיקרון היחסות הוא: חוקי הפיזיקה הם זהים בכל מערכות ההתמדה. על סמך עקרון היחסות, ניתן להגיע למסקנה הבאה: לא ניתן

תרגילים ובעיות – פרק 9

1. מערכות התמדה

1. נתונה מערכת A שנמצאת במצב התמדה. איך ניתן לקבוע שמערכת B נמצאת גם היא במצב התמדה? הסבר את תשובתך.
4. נתון גוף הנמצא במערכת מסוימת במצב התמדה.
 - א. מהו מספר המערכות שגוף זה נמצא בהן במצב התמדה.
 - ב. הגדר את "מערכת המנוחה" של הגוף.

1. הגדר מערכת התמדה, וקבע איך ניתן לקבוע אם מערכת מסוימת היא מערכת התמדה או לא.
2. הבא שתי דוגמאות המראות כי החוק הראשון של ניוטון אינו מתקיים במערכות מואצות.
- 3.

2. חוקי ניוטון ומערכות התמדה

5.

נתונות שתי מערכות התמדה A ו- B . מערכת B נעה במהירות קבועה $\vec{v}_0$ ביחס למערכת A .

במערכת A נמצא גוף הנע בתאוצה קבועה $\vec{a}_A$ בהשפעת כוח קבוע $\vec{F}_A$, ומהירותו בזמן מסוים היא $\vec{v}_A$. בטא את הגדלים הבאים במערכת B .

א. מהירות הגוף.

ב. תאוצת הגוף.

ג. הכוח הפועל על הגוף.

6.

הראה שהחוקים הראשון, השני והשלישי של ניוטון מתקיימים במערכות ההתמדה.

7.

נניח כי אתה נמצא בתוך מערכת סגורה הנעה בתאוצה קבועה.

א. האם אתה יכול, כשאתה נתון בתוך המערכת, לקבוע אם היא נעה בתאוצה? הסבר.

ב. האם אתה יכול לקבוע את כיוון התאוצה? הסבר.

ג. האם אתה יכול לקבוע את כיוון מהירות המערכת? הסבר.

8.

מסה נקודתית קשורה לתקרת עגלה באמצעות חוט חסר מסה. נתון שהעגלה נעה על משטח אופקי בתאוצה קבועה a . כתוצאה מתנועת העגלה בתאוצה נוצרת זווית α בין החוט לאנך.

שלושה צופים עוקבים אחר תנועת המסה. הראשון נמצא בתוך העגלה, השני נמצא במנוחה על המשטח מחוץ לעגלה, והשלישי נמצא בעגלה אחרת הנעה על המשטח במהירות קבועה ביחס לצופה השני.

א. קבע איזה מבין שלושת הצופים נחשב למערכת התמדה.

ב. חשב את תאוצת העגלה ביחס לצופה השלישי.

ג. מהם הכוחות הפועלים על המסה ביחס לכל אחד משלושת הצופים.

ד. מהו הקשר בין הכוחות הפועלים על המסה ביחס לשלושת הצופים.

3. עיקרון היחסות

9.

א. נסח את עיקרון היחסות?

ב. מהי המסקנה המתקבלת מעיקרון היחסות.

10.

אסטרונוט נמצא בתוך חללית הנמצאת במצב התמדה. האם האסטרונוט יכול לקבוע אם החללית נמצאת במנוחה או נעה במהירות קבועה? אם השבת בכך הסבר כיצד, ואם השבת בלא הסבר מדוע.

4. האם כדור הארץ נחשב למערכת התמדה?

11.

א. האם כדור הארץ נחשב למערכת התמדה? הסבר את תשובתך.

ב. תן דוגמאות המראות כי כדור הארץ אינו מערכת התמדה.

12.

א. חשב את התאוצה הצנטריפטלית של הגופים הנמצאים על קו המשווה של כדור הארץ. נתון כי רדיוס כדור הארץ הוא $6,380 \text{ km}$.

ב. חשב את תאוצת כדור הארץ בתנועתו סביב השמש אם נתון שמרחקו ממרכז השמש הוא $1.5 \times 10^8 \text{ km}$, ושמהירותו סביב השמש היא 30 km/s .

13.

האם הגוף הנזרק על פני כדור הארץ אנכית כלפי מעלה במהירות גבוהה חוזר בדיוק לנקודה ממנה נזרק? אם השבת בכך הסבר מדוע, ואם השבת לא – נמק תשובתך.

14.

א. מהו עיקרון השקילות? הסבר.

ב. מהן המסקנות המתקבלות מעיקרון השקילות? הסבר.